

ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКАЯ БИОЛОГИЯ

Научная статья
УДК 581.1:661.163

EDN: MBSOJL

DOI: 10.21285/2227-2925-2023-13-4-589-601



Влияние тебуконазола и азоксистробина на физиологические параметры и устойчивость проростков пшеницы к водному дефициту

Т.П. Побежимова*, Е.В. Бережная*, Е.А. Полякова*, А.В. Корсукова*, Н.С. Забанова***,
И.В. Любушкина***, А.В. Степанов*, Н.В. Дорофеев*, О.И. Грабельных✉***

*Сибирский институт физиологии и биохимии растений СО РАН, г. Иркутск, Российская Федерация

**Иркутский государственный университет, г. Иркутск, Российская Федерация

Аннотация. Фунгициды класса триазолов и стробилуринов активно применяются в сельском хозяйстве в составе протравителей для защиты растений от грибковых заболеваний, кроме того, они оказывают на растения различные физиологические эффекты, в том числе могут повышать устойчивость к неблагоприятным факторам среды. Совместное действие данных фунгицидов при водном дефиците мало изучено. Целью представленного исследования было изучение отдельного и совместного влияния тебуконазола и азоксистробина на ростовые характеристики и устойчивость пшеницы к водному дефициту. В ходе работы использовали растения озимой пшеницы (*Triticum aestivum* L.), выращенные из семян, обработанных суспензиями тебуконазола (2 мг/50 г семян) и азоксистробина (4 мг/50 г семян) по отдельности или совместно. Для создания водного дефицита проростки в возрасте 5 суток перемещали на раствор 20%-го полиэтиленгликоля (ПЭГ 6000), устойчивость оценивали в возрасте 7 и 9 суток. Установлено, что тебуконазол оказывал ретардантный эффект на побеги и стимулировал рост корней. Азоксистробин ингибировал рост побегов и особенно рост корней. При совместной обработке тебуконазол частично снижал вызванное азоксистробином ингибирование корневой системы. Азоксистробин усиливал отрицательное действие водного дефицита, в то время как тебуконазол эффективно защищал корневую систему проростков и частично снижал действие азоксистробина. Сделано заключение, что стимулирование роста корневой системы тебуконазолом играет важную роль в обеспечении устойчивости озимой пшеницы к водному дефициту и может быть использовано в сельском хозяйстве.

Ключевые слова: пшеница, тебуконазол, азоксистробин, рост побегов и корней, водный дефицит

Благодарности. Исследования проводились на оборудовании Центра коллективного пользования «Биоаналитика» с использованием коллекций Центра коллективного пользования «Биоресурсный центр» Сибирского института физиологии и биохимии растений СО РАН (г. Иркутск, Российская Федерация).

Финансирование. Работа выполнена в рамках государственного задания Сибирского института физиологии и биохимии растений СО РАН (№ 122041100049-0).

Для цитирования: Побежимова Т.П., Бережная Е.В., Полякова Е.А., Корсукова А.В., Забанова Н.С., Любушкина И.В. [и др.]. Влияние тебуконазола и азоксистробина на физиологические параметры и устойчивость проростков пшеницы к водному дефициту // Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология. 2023. Т. 13. N 4. С. 589–601. DOI: 10.21285/2227-2925-2023-13-4-589-601. EDN: MBSOJL.

PHYSICOCHEMICAL BIOLOGY

Original article

Effect of tebuconazole and azoxystrobin on the physiological parameters of wheat seedlings and their resistance to water stress

Tamara P. Pobezhimova*, Ekaterina V. Berezhnaya*, Elizaveta A. Polyakova*,
Anna V. Korsukova*, Natalya S. Zabanova***, Irina V. Lyubushkina***,
Alexey V. Stepanov*, Nikolay V. Dorofeev*, Olga I. Grabelnykh✉***

*Siberian Institute of Plant Physiology and Biochemistry SB RAS, Irkutsk, Russian Federation

**Irkutsk State University, Irkutsk, Russian Federation

© Побежимова Т.П., Бережная Е.В., Полякова Е.А., Корсукова А.В., Забанова Н.С., Любушкина И.В., Степанов А.В., Дорофеев Н.В., Грабельных О.И., 2023

Abstract. Strobilurin and triazole class fungicides are actively used in agriculture as part of dressers to protect plants from fungal disease. In addition, they have various physiological effects on plants, including increased resistance to adverse environmental factors. The combined effect of these fungicides under water stress is understudied. The present work aims to examine the individual and combined effects of tebuconazole and azoxystrobin on the growth characteristics of wheat and its resistance to water stress. The study used winter wheat (*Triticum aestivum* L.) plants grown from seeds treated with tebuconazole (2 mg/50 g seeds) and azoxystrobin (4 mg/50 g seeds) suspensions separately or together. In order to create water stress, five-day seedlings were transferred to 20% polyethylene glycol solution (PEG 6000), with stability assessed at seven and nine days. Tebuconazole was found to have a retardant effect on shoots and stimulate root growth. Azoxystrobin inhibited shoot growth and particularly root growth. When used together, tebuconazole partially reduced azoxystrobin-induced root inhibition. Azoxystrobin increased the negative effect of water stress, while tebuconazole effectively protected the root system of seedlings, partially reducing the effect of azoxystrobin. The stimulation of root growth with tebuconazole was concluded to play an important role in providing resistance of winter wheat to water stress and to have the potential for use in agriculture.

Keywords: wheat, tebuconazole, azoxystrobin, shoot growth, root growth, water stress

Acknowledgements. The research was carried out using the equipment of the Center for Collective Use "Bioanalytics" and the collections of the Center for Collective Use "Bioresource Center" of the Siberian Institute of Plant Physiology and Biochemistry SB RAS (Irkutsk, Russian Federation).

Funding. The work was performed within the framework of the state assignment of the Siberian Institute of Plant Physiology and Biochemistry SB RAS (no. 122041100049-0).

For citation: Pobezhimova T.P., Berezhnaya E.V., Polyakova E.A., Korsukova A.V., Zabanova N.S., Lyubushkina I.V., et al. Effect of tebuconazole and azoxystrobin on the physiological parameters of wheat seedlings and their resistance to water stress. *Izvestiya Vuzov. Prikladnaya Khimiya i Biotekhnologiya = Proceedings of Universities. Applied Chemistry and Biotechnology*. 2023;13(4):589-601. (In Russian). DOI: 10.21285/2227-2925-2023-13-4-589-601. EDN: MBSQJL.

ВВЕДЕНИЕ

Дефицит воды и засуха являются одними из основных абиотических стрессов, оказывающих негативное влияние на продуктивность растений. Изучение механизмов адаптации к водному дефициту, поиск и разработка технологий снижения неблагоприятного действия этого фактора на растения является актуальной задачей растениеводства. Водный дефицит угнетает рост, реакции фотосинтеза и дыхания, приводит к развитию окислительного стресса и снижает урожайность важных сельскохозяйственных культур. Повышение устойчивости растений к недостатку влаги в почве возможно путем применения средств химической защиты. Протравливание семенного материала фунгицидными препаратами при предпосевной обработке семян представляет собой эффективный способ предотвращения грибковых заболеваний, а наличие выраженных физиологических эффектов этих веществ на растения позволяет считать ряд фунгицидов «стресс-протекторами». Такой термин вполне подходит для азолов и стробилуринов, препараты на основе которых занимают значительное место в сельскохозяйственном производстве.

Азолы представляют собой системные фунгициды защитного, искореняющего и лечебного действия, им свойственна низкая фитотоксичность и широкий спектр противогрибковой активности¹ [1]. Фунгицидная активность азолов связана с их способностью нарушать биосинтез стерина и терпеноидов у грибов¹ [2]. Выступая в качестве ретардантов, азолы вызывают у зерновых культур торможение удлинения междоузлий и роста осевых органов растений за счет нарушения биосинтеза гиббереллинов¹. Наибольшее применение среди азолов получили триазолы, которые оказывают физиологические

эффекты на растения и помимо ретардантного действия и влияния на баланс гормонов (ингибирование синтеза гиббереллинов и повышение содержания абсцизовой кислоты) увеличивают содержание хлорофилла (эффект «зеленения» листьев), растворимого белка и сахаров, вызывают изменения в интенсивности дыхания, функционировании системы антиоксидантной защиты клетки, изменяют состав жирных кислот и в итоге влияют на устойчивость к стрессам и урожайность [3]. Одним из представителей производных 1,2,4-триазола является тебуконазол, который в основном применяют как профилактический и лечебный системный фунгицид, поскольку он эффективен против всех видов ржавчины зерновых культур, септориоза, а также подавляет головневые грибы, возбудителей корневых гнилей и плесневения семян¹. Тебуконазол и тебуконазол-содержащие препараты оказывают разнонаправленный эффект на рост побегов и корней пшеницы: ингибируют рост побегов, но стимулируют рост корней [4, 5]. Показан положительный эффект триазолов и, в частности, тебуконазола на устойчивость растений к водному дефициту, засухе и засолению [6–8]. Усиление устойчивости к недостатку влаги в основном было связано с более развитой под действием триазолов корневой системой, повышенным содержанием пигментов, более эффективной работой фотосинтетического аппарата и антиоксидантной системы защиты клетки.

Стробилурины представляют собой контактные фунгициды с лечущим действием и частичным системным эффектом¹. Их фунгицидное действие связано с ингибированием митохондриального дыхания клеток патогенов на уровне комплекса III [9]. Как и триазолам, стробилуринам свойственна низкая фитотоксичность¹

¹Попов С.Я., Дорожкина Л.А., Калинин В.А. Основы химической защиты растений: учеб. пособие. М.: Арт-Лион, 2003. 208 с.

и наличие физиологических эффектов действия на растения, которые очень сильно варьируют не только среди видов, но даже внутри одного вида [10]. Среди стробилируинов наиболее широкое применение получил метоксиакрилат азоксистробин, ингибирующий прорастание спор грибов и обладающий искореняющим, защитным, трансламинарным и системным действием [9]. Некоторые авторы отмечают сходные физиологические эффекты триазолов и стробилируинов, например, Янь-Цзюнь Чжан с соавторами [11] обнаружили, что опрыскивание тебуконазолом и азоксистробином сходным образом предотвращает старение листьев озимой пшеницы в полевых условиях и позволяет получить более высокий урожай зерна. Задержка старения листьев пшеницы [11] и женьшеня [12] была связана с повышением активности антиоксидантных ферментов и снижением развития окислительного стресса. Среди других эффектов действия азоксистробина авторы отмечали увеличение содержания хлорофилла и растворимого белка. Существуют данные об увеличении содержания сахаров под влиянием азоксистробина [13]. В отличие от триазолов, азоксистробин ингибирует длину не только побегов, но и корней [13, 14]. Показаны как положительные эффекты азоксистробина при стрессе, вызванном водным дефицитом и засухой [10, 14–17], так и отрицательные [18]. Азоксистробин восстанавливал скорость ассимиляции углекислого газа и устьичную проводимость и повышал урожай зерна пшеницы [15]. Совместное применение азоксистробина с другими регуляторами роста (4-хлорфеноксиуксусной кислотой) позволяло частично избежать проявления его негативных эффектов, например задержки прорастания семян [19].

Комбинирование в составе препаратов для протравливания семян нескольких действующих веществ из разных классов предотвращает формирование у патогенов резистентности и повышает эффективность обработки. Пока остается слабоизученным вопрос о том, какое влияние оказывает сочетание фунгицидов с различным механизмом действия на физиологические процессы растений. При выборе протравителя и разработке комбинированных препаратов рекомендуется учитывать возможный фитотоксический эффект, зависящий от дозы протравителя и сочетания фунгицидов [20]. Комбинации действующих веществ могут по-разному влиять на всхожесть семян, рост проростков и стрессоустойчивость растений, при этом не всегда удается выявить вклад отдельного фунгицида в оказываемое препаратом действие. Так, показан положительный эффект совместной обработки тебуконазолом и трифлостробином на ростовые процессы, содержание пигментов, состояние воды в листьях, про- или антиоксидантный статус и ряд других показателей у пшеницы при засолении и кадмиевом стрессе [21–23].

Недостаточная водообеспеченность в осенний период роста и развития озимых культур является одним из значимых риск-факторов, определяющих полевую всхожесть, а также подготовку растений к зимовке и, как следствие, их зимостойкость и дальнейшую продуктивность. Предпосевная обработка семян служит наиболее экономически эффективным и экологически безопасным способом коррекции фитосанитарного состояния семян и растений, а дополнительные физиологические эффекты фунгицидных протравителей позволяют влиять и на

устойчивость растений к неблагоприятным факторам различной природы. Совместное действие тебуконазола и азоксистробина при обработке семенного материала на физиологические характеристики озимой пшеницы при водном дефиците ранее не исследовалось.

Целью представленного исследования было изучение влияния тебуконазола и азоксистробина по отдельности и совместно на ростовые показатели и устойчивость проростков озимой пшеницы к водному дефициту, вызванному полиэтиленгликолем (ПЭГ 6000).

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

В работе использовали растения озимой пшеницы (*Triticum aestivum* L.) сорта Иркутская в возрасте 5, 7 и 9 суток, выращенные из семян, обработанных и не обработанных фунгицидами. Очищенные от пыли и примесей семена обрабатывали суспензиями тебуконазола (2 мг/50 г семян) и азоксистробина (4 мг/50 г семян) по отдельности (варианты «ТЕБ» и «АЗ») или совместно (вариант «ТЕБ + АЗ»). Фунгициды растворяли в диметилсульфоксиде (ДМСО) (50 мкл ДМСО/50 г семян), переносили в небольшой объем воды для получения мутно-белой суспензии, которой обрабатывали влажные семена. В качестве контрольных использовали не обработанные фунгицидами семена, поверхность которых обрабатывалась либо дистиллированной водой (вариант «К1»), либо ДМСО (вариант «К2»).

Сразу же после нанесения фунгицидов на поверхность семян семена заливали дистиллированной водой выше уровня семян на 1 см и оставляли набухать в темноте в течение суток при комнатной температуре. Данный способ обработки был выбран как оптимальный для проявления ретардантного эффекта фунгицидов на основании предварительных экспериментов. С не обработанными фунгицидами семенами проводили те же действия. Через сутки воду сливали, семена промывали и оставляли еще на сутки в закрытом сосуде в этих же условиях. Проклюнувшиеся семена распределяли на рамки из полиамидной сетки, размещенные в пластиковых контейнерах (объемом 3,5 л) с водой и выращивали в камере KBW 720 (Binder, Германия) с температурой $23/20 \pm 0,1$ °C (фотопериод 16 ч), влажностью 70% и освещенностью 250 мкмоль/м²·с⁻¹ ФАР. Через двое суток растения переносили на раствор Кнопа (1/2 нормы) и продолжали выращивать до возраста 5 суток. У 5-суточных проростков питательный раствор заменяли на свежий, а для создания водного дефицита часть растений переносили на раствор Кнопа, содержащий 20%-й полиэтиленгликоль с молекулярной массой $M_r \geq 6000$ (ПЭГ 6000), и продолжали выращивать проростки до возраста 7 суток. У 7-суточных проростков растворы заменяли на свежие и выращивали их до возраста 9 суток. Общая продолжительность воздействия ПЭГ 6000 составила 96 часов. Молекулы ПЭГ 6000 инертные, нетоксичные, не проникают в ткани растения и позволяют выводить воду из клетки контролируемым образом, поэтому его широко применяют для моделирования условий почвенной засухи на разных культурах, в том числе пшенице [24]. Концентрацию ПЭГ 6000 подбирали в предварительном эксперименте.

Для оценки влияния фунгицидов на рост измеряли длину надземной части (длину coleoptily и всего побега) и суммарную длину корней у проростков в возрасте 5,

7 и 9 суток. Влияние водного дефицита на ростовые параметры оценивали через 48 и 96 часов нахождения проростков на растворе с ПЭГ 6000 (в возрасте проростков 7 и 9 суток). Проводили по 50 независимых измерений в каждой биологической повторности. Также рассчитывали для каждого проростка отношение длины побега к сумме длин корней – данный показатель наглядно отображает направленность действия фунгицидов на ростовые процессы. Для определения сырой и сухой биомассы использовали по 50 штук проростков каждого варианта. Высушивание проводили при 80 °C до постоянного веса.

Статистическую обработку данных осуществляли с помощью программного пакета SigmaPlot v. 14.0. Данные представлены в виде медианы и интерквартильной широты [25%; 75%]. Для доказательства наличия значимых различий использовали ранговый однофакторный дисперсионный анализ Краскела – Уоллиса с последующей процедурой множественного сравнения по методу Данна. Различия между экспериментальными данными считали статистически значимыми при $p \leq 0,05$.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Многие фунгициды помимо своей основной активности оказывают на растения побочные физиологические эффекты – как положительные (регуляция роста и повышение устойчивости к стрессам), так и отрицательные (токсическое действие). Ранее мы показали, что тебуконазол-содержащий протравитель «Бункер» (АО «Август», Россия, действующее вещество тебуконазол 60 г/л) в рекомендуемой производителем (0,5 л/т) и трехкратно повышенной дозах ингибирует рост побегов и стимулирует рост корней озимой пшеницы [5]. Препарат ожидаемо проявлял фунгицидный эффект, не оказывал фитотоксического действия и не снижал всхожесть семян, при этом приводил к повышению морозоустойчивости [25]. Стимулирование роста корневой системы у яровой пшеницы и ярового ячменя наблюдалось после обработки семян другим тебуконазол-содержащим протравителем – «Ламадор» (АО «Байер», действующие вещества протиоконазол 250 г/л и тебуконазол 150 г/л) [4]. Увеличение длины корней после обработки протравителем «Ламадор» в первые недели роста растений повышало засухоустойчивость и улучшало потребление влаги и элементов питания, а также увеличивало коэффициент кущения [4]. В то же время фунгицид азоксистробин в чистом виде в концентрации 5–20 мкМ вызывал значительное ингибирование роста побегов и корней озимой пшеницы, однако не имел фитотоксического действия [13]. Ингибирование азоксистробином длины корней и побегов и сырого веса побегов отмечалось и другими авторами [14].

Определение морфометрических параметров (длина coleoptили, длина побега, сумма длин корней, сырая и сухая биомасса побегов и корней) проростков озимой пшеницы, выращенных из обработанных фунгицидами семян, подтвердило различия в направленности изменений ростовых процессов, вызываемых тебуконазолом и азоксистробином. Спустя 5 суток роста было обнаружено, что обработка семян тебуконазолом снижала длину надземной части проростка (на 27–30%) и не влияла на рост корней (рис. 1, а, б). Снижение длины побегов под действием тебуконазола не сопровождалось

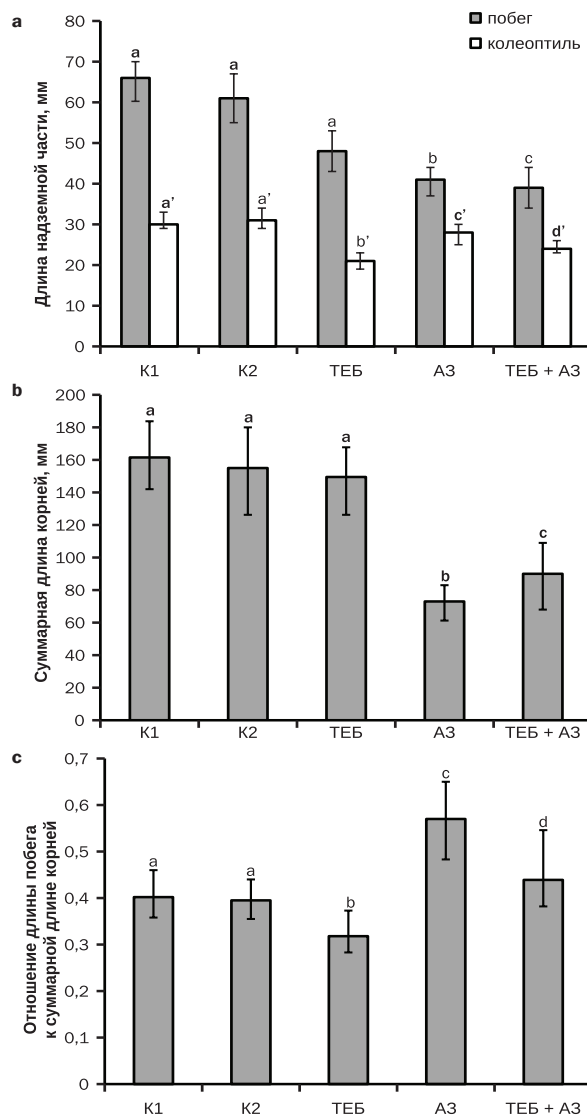


Рис. 1. Влияние фунгицидов на длину coleoptилей и побегов (а), сумму длин корней (б) и отношение длины побега к сумме длин корней (в) проростков озимой пшеницы в возрасте 5 суток. K1 – необработанные семена (контроль, дистиллированная вода); K2 – семена, обработанные диметилсульфоксидом (контроль, диметилсульфоксид); TEB – семена, обработанные тебуконазолом (2 мг/50 г семян); A3 – семена, обработанные азоксистробином (4 мг/50 г семян); TEB + A3 – семена, обработанные совместно тебуконазолом (2 мг/50 г семян) и азоксистробином (4 мг/50 г семян). Данные представлены в виде медианы [25%; 75%], $n = 100–200$. Разными буквами показаны статистически значимые различия при $P \leq 0,05$ (метод Данна)

Fig. 1. Effect of fungicides on the length of coleoptiles and shoots (a), the sum of root lengths (b) and the ratio of shoot length to the sum of root lengths (c) in winter wheat seedlings on the 5th day of growth. K1 – untreated seeds (control, distilled water); K2 – seeds treated with dimethyl sulfoxide solution (control, dimethyl sulfoxide); TEB – seeds treated with tebuconazole (2 mg/50 g seeds); A3 – seeds treated with azoxystrobin (4 mg/50 g of seeds); TEB + A3 – seeds treated together with tebuconazole (2 mg/50 g of seeds) and azoxystrobin (4 mg/50 g of seeds). Data are presented as Me [25%; 75%], $n = 100–200$. Different letters show statistically significant differences at $P \leq 0.05$ (Dunn's method)

статистически значимым снижением сырой и сухой биомассы (рис. 2). Внешне побеги выглядели крепкими, имели утолщенный стебель, более широкую листовую пластинку и темно-зеленый цвет. Следует отметить, что контрольные проростки из не обработанных фунгицидами семян, поверхность которых обрабатывалась дистиллированной водой (K1) или ДМСО, являвшимся растворителем для фунгицидов (K2), не отличались между собой по ростовым характеристикам (см. рис. 1, 2), поэтому изменения параметров роста после обработки фунгицидами приведены в процентах от показателей варианта K1.

Отличное от тебуконазола действие на проростки озимой пшеницы оказывала обработка семян азоксистробинном: он не только более существенно снижал рост побегов (на 37%), но и значительно ингибировал рост корней (на 55%) (см. рис. 1, а, б). Снижение длины

побегов и корней под действием азоксистробина приводило к статистически значимому снижению сырой и сухой биомассы (см. рис. 2). Внешне побеги выглядели более тонкими, имели узкую листовую пластинку и светло-зеленый цвет. При совместной обработке семян тебуконазолом и азоксистробинном, так же, как и при обработке отдельно азоксистробинном, наблюдали снижение длины побегов и корней и снижение их биомассы (см. рис. 1, 2). Однако ингибирование длины побегов и корней в случае совместной обработки было менее выражено, что свидетельствует о возможном защитном действии тебуконазола. Направленность изменений роста побега и корней под влиянием тебуконазола и азоксистробина и их совместного действия отражает такой показатель, как отношение длины побега к сумме длин корней: его величина снижается при ингибировании длины побегов в большей степени, чем корней,

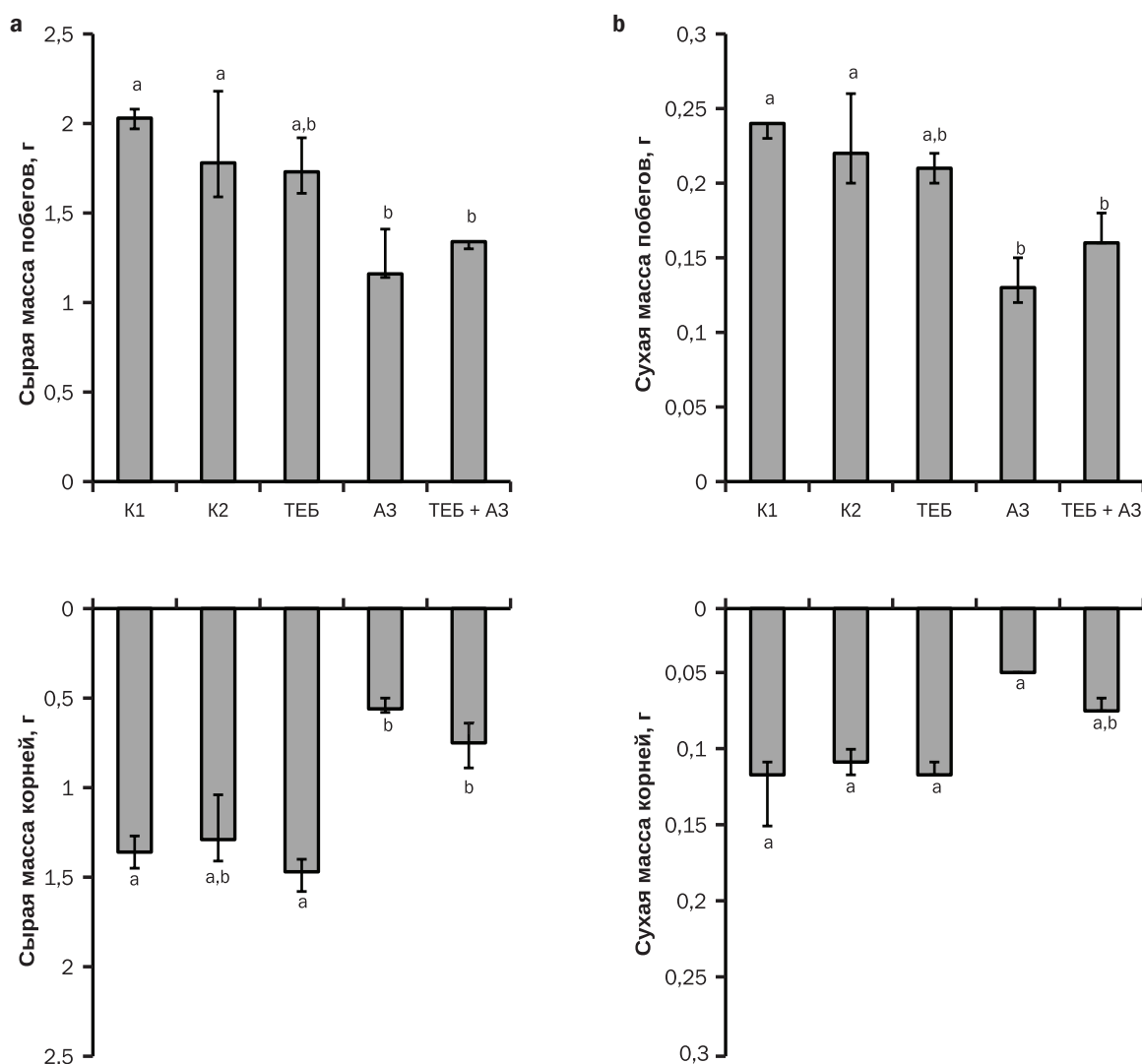


Рис. 2. Влияние фунгицидов на сырую (а) и сухую (б) биомассу побегов и корней проростков озимой пшеницы в возрасте 5 суток. Сырая и сухая биомасса включают вес 50 проростков. Обозначения те же, что и на рис. 1. Данные представлены в виде медианы [25%; 75%], $n = 3-5$. Разными буквами показаны статистически значимые различия при $P \leq 0,05$ (метод Данна)

Fig. 2. Effect of fungicides on the wet (a) and dry (b) biomass of shoots and roots of winter wheat seedlings on the 5th day of growth. Wet and dry biomass include the weight of 50 seedlings. The designations are the same as in Fig. 1. Data are presented as Me [25%; 75%], $n = 3-5$. Different letters indicate statistically significant differences at $P \leq 0.05$ (Dunn's method)

и, наоборот, увеличивается при сильном ингибировании длины корней (рис. 1, с).

Ранее было установлено, что ингибирование роста побегов под действием тебуконазол-содержащего протравителя «Бункер» и чистого азоксистробина сопровождается снижением расхода сахаров, что приводит к их более высокому содержанию в тканях побегов [3, 13]. Меньший расход сахаров под действием этих фунгицидов также может быть связан с их функционированием в качестве ингибиторов дыхания: тебуконазол ингибирует транспорт электронов через комплекс I дыхательной цепи [26], а азоксистробин, как известно из литературы, блокирует транспорт электронов через комплекс III дыхательной цепи [9]. Сахара выполняют осморегуляторную, криопротекторную и антиоксидантную функции и задействованы в защитных реакциях растений при водном дефиците.

Чтобы оценить влияние тебуконазола и азоксистробина по отдельности и совместно на устойчивость проростков озимой пшеницы к водному дефициту, использовали осмотик ПЭГ 6000, который вносили в питательную среду через 5 суток роста в конечной концентрации 20%, и отслеживали изменения ростовых характеристик через 48 (возраст проростков 7 суток) и 96 (возраст проростков 9 суток) часов воздействия (рис. 3, 4).

В отсутствии водного дефицита у 7- и 9-суточных проростков действие тебуконазола на побеги и корни озимой пшеницы сохранялось и даже усиливалось. Так, у 7-суточных проростков было обнаружено, что тебуконазол снижает длину побегов на 31%, при этом он не влияет на длину корней и на биомассу побегов и корней (см. рис. 3, 4). У 9-суточных проростков ингибирование длины побегов тебуконазолом составило 35% и он значительно стимулировал рост корней – суммарная длина корней у проростков увеличивалась на 40% по сравнению с контрольными (см. рис. 3). Сырая масса побегов и корней статистически значимо не изменялась (см. рис. 4). Обработка азоксистробинем снижала длину побегов на 20 и 18%, а длину корней на 46 и 44% у 7- и 9-суточных проростков соответственно (см. рис. 3), эти изменения сопровождалось снижением сырой и сухой биомассы побегов и корней (см. рис. 4). При совместной обработке тебуконазолом и азоксистробинем ингибирование длины побегов и корней у 7-суточных проростков составляло 37% и сопровождалось уменьшением сырой и сухой биомассы (см. рис. 3, 4). При этом обнаруживалась тенденция к повышению показателей биомассы при совместной обработке по сравнению с действием только азоксистробина, что, вероятно, было связано с проявлением защитного эффекта тебуконазола. Защитный эффект тебуконазола при совместной обработке в большей мере проявился у 9-суточных проростков и был направлен на развитие корневой системы, при этом суммарная длина корней у проростков этого варианта (ТЕБ + АЗ) соответствовала длине корней проростков из необработанных семян (К1 и К2) (см. рис. 3). Сырая масса корней и побегов при совместной обработке не отличалась от показателей контрольных растений.

Водный дефицит оказывал существенное влияние на ростовые характеристики проростков озимой пшеницы, особенно на их корневую систему. В присутствии ПЭГ

6000 в питательной среде через 48 часов воздействия (7-суточные проростки) наблюдали снижение длины побегов на 16–18% у контрольных вариантов и на 21% у проростков, выращенных из семян, обработанных азоксистробинем (см. рис. 3, 4). При этом осмотик не оказывал влияния на длину побегов проростков из обработанных тебуконазолом семян и на длину побегов проростков, выращенных из семян, подвергнутых совместной обработке тебуконазолом и азоксистробинем. Независимо от влияния на длину побегов, сырая биомасса побегов снижалась во всех вариантах. Водный дефицит снижал длину корней контрольных и обработанных тебуконазолом проростков и не влиял на длину корней после обработки азоксистробинем и при совместной обработке. Сырая масса корней снижалась только у контрольных вариантов.

Через 96 часов воздействия ПЭГ 6000 сохранялось действие водного дефицита на рост побегов и корней озимой пшеницы: наблюдалось снижение длины побегов у контрольных проростков и проростков из семян, обработанных азоксистробинем (как отдельно, так и совместно с тебуконазолом). При этом азоксистробин при отдельном действии усиливал отрицательное действие водного дефицита на побеги: если ингибирование длины побега у контрольных вариантов составляло 16–18%, то после обработки азоксистробинем оно выросло до 32% (см. рис. 3). Сырая масса побегов снижалась у всех вариантов, но ингибирование прироста биомассы было наиболее существенным в варианте обработки семян азоксистробинем как отдельно, так и совместно с тебуконазолом. Если снижение прироста биомассы у вариантов К1, К2 и при действии тебуконазола в среднем составляло 29–33%, то в варианте с обработкой семян азоксистробинем – 40%. Статистически значимое снижение сухой биомассы при водном дефиците также наблюдали только при обработке семян азоксистробинем отдельно или совместно с тебуконазолом. Длина корней контрольных проростков и проростков, выращенных из семян, обработанных тебуконазолом, через 96 часов воздействия ПЭГ 6000 снижалась, но у обработанных тебуконазолом проростков абсолютное значение суммы корней было на уровне контрольных без воздействия осмотического агента. Водный дефицит не оказывал влияния на длину корней, обработанных азоксистробинем, но ингибировал длину корней при совместной с тебуконазолом обработке, хотя абсолютное значение было на уровне контрольных растений при водном дефиците. Таким образом, тебуконазол снижал негативное действие азоксистробина через 96 часов воздействия осмотика.

Полученные нами результаты о защитном действии тебуконазола при водном дефиците согласуются с результатами исследований других авторов. Так, тебуконазол и другие триазолы (гексаконазол и пропиконазол) снижали действие засухи на растения подсолнечника, что проявлялось в увеличении длины корней, повышении содержания хлорофиллов, каротиноидов и антоцианов, а также урожайности [7]. Опрыскивание тебуконазолом повышало устойчивость растений сахарной свеклы к водному стрессу за счет улучшения параметров роста и фотосинтеза, активации ряда антиоксидантных ферментов и снижения окислительного стресса, что приводило к повышению урожайности [8]. Увеличение содержания

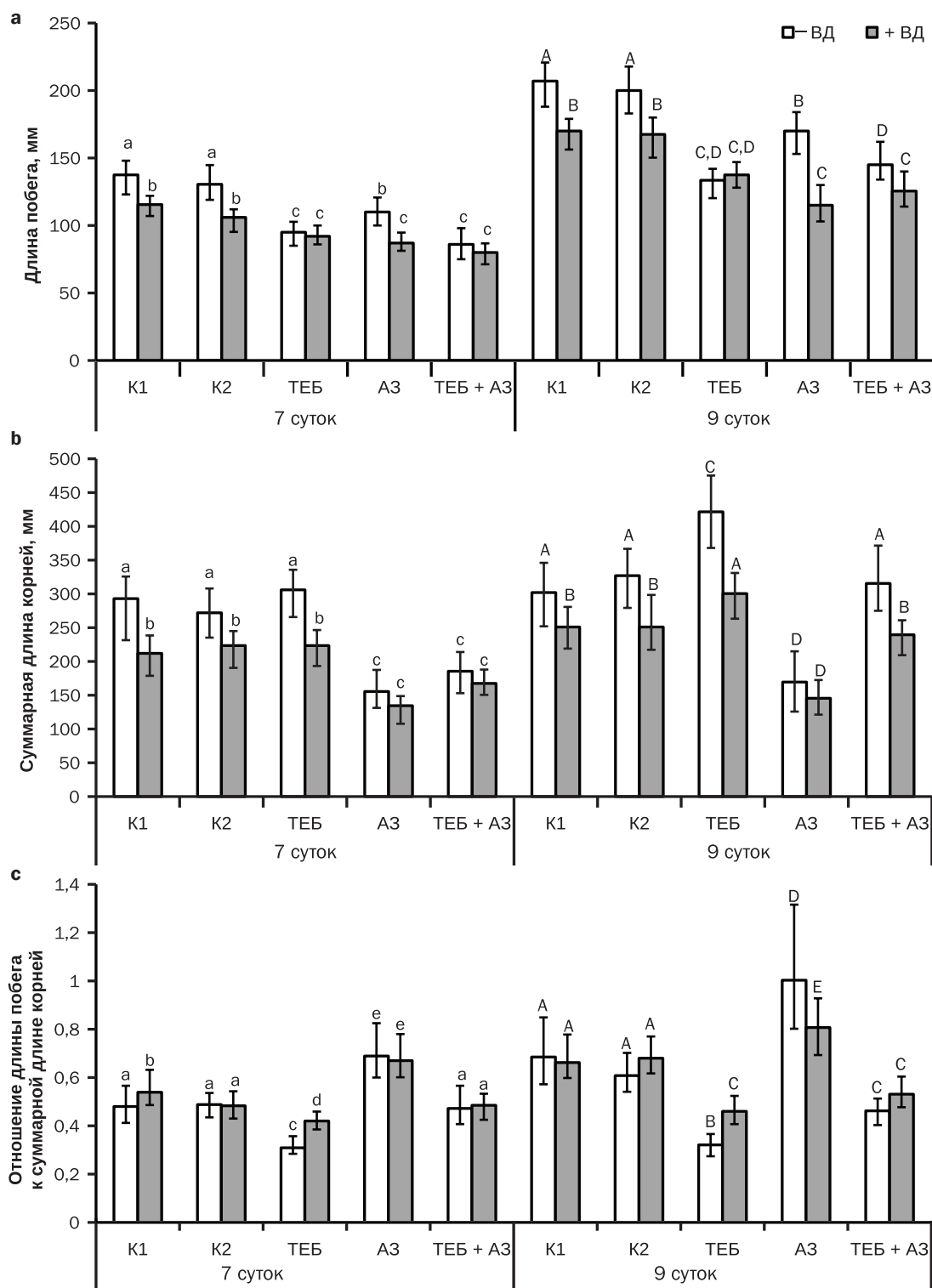


Рис. 3. Влияние фунгицидов и водного дефицита (ВД) на длину побегов (а), сумму длин корней (б) и отношение длины побега к сумме длин корней (в) проростков озимой пшеницы в возрасте 7 и 9 суток. Проростки в возрасте 5 суток переносили на питательный раствор, содержащий 20% ПЭГ 6000, и подвергали стрессу в течение 48 и 96 часов (анализ проводили на 7-е и 9-е сутки роста соответственно). Обозначения те же, что и на рис. 1. Данные представлены в виде медианы [25%; 75%], $n = 100-200$. Разными буквами показаны статистически значимые различия при $P \leq 0,05$ (метод Данна)

Fig. 3. Effect of fungicides and water deficit (ВД) on the length of shoots (a), the sum of root lengths (b) and the ratio of shoot length to the sum of root lengths (c) of winter wheat seedlings on the 7th and 9th days of growth. Seedlings at the age of 5 days were transferred to a nutrient solution containing 20% PEG 6000 and subjected to stress for 48 and 96 hours (analysis was carried out on days 7 and 9 of growth, respectively). The designations are the same as in Fig. 1. Data are presented as Me [25%; 75%], $n = 100-200$. Different letters show statistically significant differences at $P \leq 0.05$ (Dunn's method)

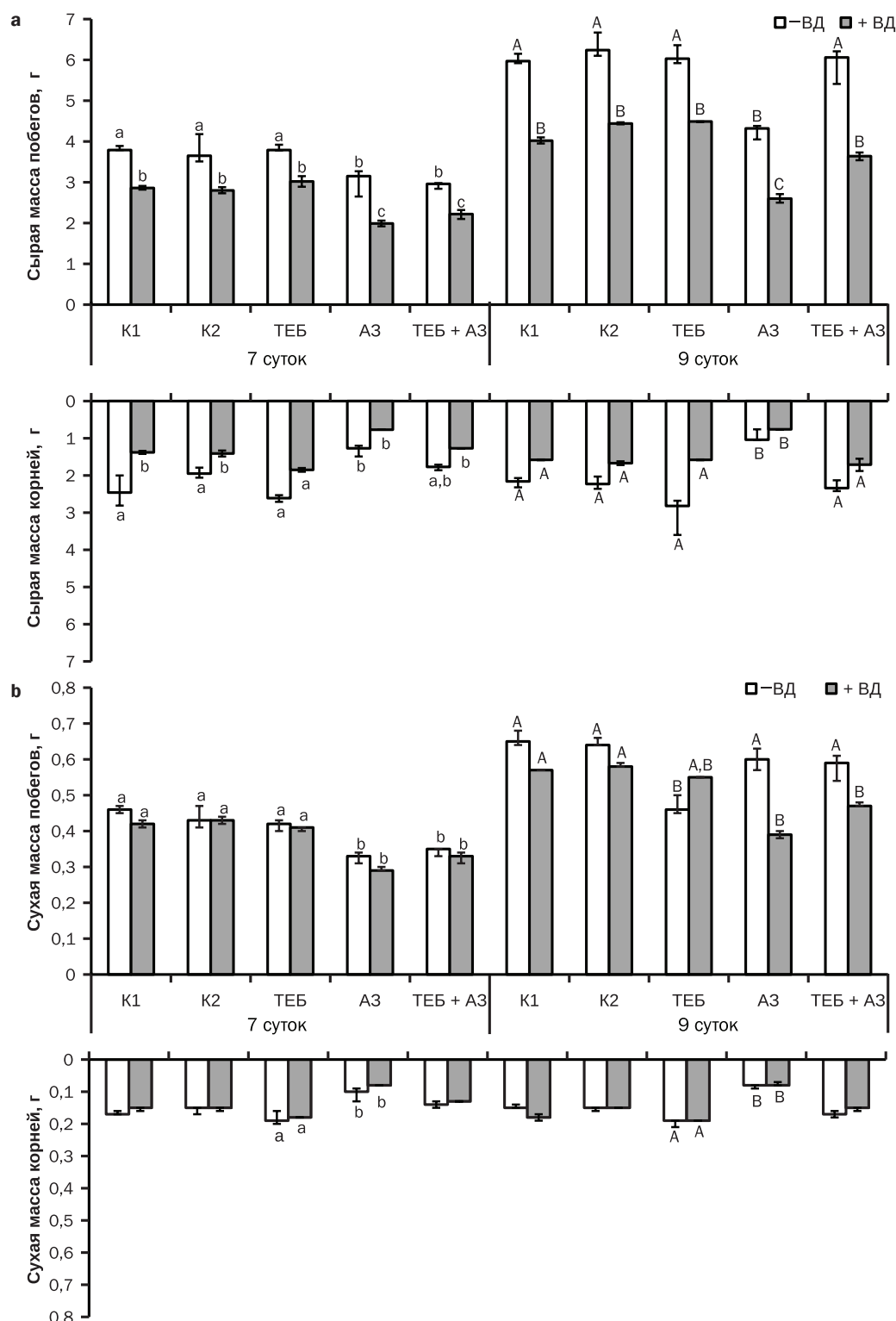


Рис. 4. Влияние фунгицидов и водного дефицита (ВД) на сырую (а) и сухую (б) биомассу побегов и корней проростков озимой пшеницы в возрасте 7 и 9 суток. Сырая и сухая биомасса включают вес 50 проростков. Проростки в возрасте 5 суток переносили на питательный раствор, содержащий 20% ПЭГ 6000, и подвергали стрессу в течение 48 и 96 часов (анализ проводили на 7-е и 9-е сутки роста соответственно). Обозначения те же, что и на рис. 1. Данные представлены в виде медианы [25%; 75%], $n = 3-5$. Разными буквами показаны статистически значимые различия при $P \leq 0,05$ (метод Данна)

Fig. 4. Effect of fungicides and water deficiency (ВД) on the wet (а) and dry (б) biomass of shoots and roots of winter wheat seedlings on the 7th and 9th days of growth. Wet and dry biomass include the weight of 50 seedlings. Seedlings at the age of 5 days were transferred to a nutrient solution containing 20% PEG 6000 and subjected to stress for 48 and 96 hours (analysis was carried out on days 7 and 9 of growth, respectively). The designations are the same as in Fig. 1. Data are presented as Me [25%; 75%], $n = 3-5$. Different letters show statistically significant differences at $P \leq 0.05$ (Dunn's method)

фотосинтетических пигментов было выявлено в полевых опытах на яровой пшенице после обработки трехкомпонентным препаратом «Солигор, КЭ», содержащим в том числе тебуконазол, вследствие чего деятельность фотосинтетического аппарата сохранялась дольше [27]. Защитный эффект азоксистробина на фотосинтетическую активность и антиоксидантную способность наблюдали на листовых дисках чая при осмотическом стрессе, вызванном ПЭГ 6000 [17]. Тем не менее в нашей работе не выявлено защитного действия азоксистробина, в отличие от тебуконазола, на растения озимой пшеницы при водном дефиците, создаваемом ПЭГ 6000.

Стимуляция развития корневой системы под действием тебуконазола может быть одним из путей повышения устойчивости озимой пшеницы к дефициту влаги в почве как в период всходов, так и после перезимовки.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, представленные данные свидетельствуют о существенных различиях в действии тебуконазола и азоксистробина на рост побегов и корней проростков озимой пшеницы как в отсутствии стресса, так и в условиях водного дефицита, создаваемого 20%-м ПЭГ 6000. Тебуконазол в концентрации 2 мг/50 г семян оказывает защитный эффект на растения в условиях

водного дефицита, что прослеживается по развитию корневой системы. Азоксистробин в концентрации 4 мг/50 г семян ингибирует рост побегов и особенно рост корней, не оказывая защитного действия на растения при выращивании на ПЭГ 6000, и даже усиливает отрицательное действие водного дефицита, что проявляется в уменьшении длины побегов. При совместном применении тебуконазола с азоксистробином при обработке семян частично снижается отрицательное действие последнего на рост побегов и корней как в условиях нормальной водообеспеченности, так и при водном стрессе.

Применение тебуконазола при обработке семян озимой пшеницы способствует лучшему росту корней, что проявляется и в условиях водного дефицита и способствует снижению отрицательного воздействия стрессового фактора на корневую систему. Благодаря своему физиологическому эффекту тебуконазол можно рассматривать в качестве перспективного компонента при создании комплексных многофункциональных препаратов для предпосевной подготовки семян, направленной на защиту растений от болезней, вредителей и повышение их устойчивости к неблагоприятным факторам внешней среды, в частности к водному дефициту.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Hof H. Critical annotations to the use of azole antifungals for plant protection // *Antimicrobial Agents and Chemotherapy*. 2001. Vol. 45, no. 11. P. 2987–2990. DOI: 10.1128/AAC.45.11.2987-2990.2001.
2. Davis T.D., Steffens G.L., Sankhla N. Triazole plant growth regulators // *Horticultural Reviews*. 1988. Vol. 10. P. 63–105. DOI: 10.1002/9781118060834.ch3.
3. Побежимова Т.П., Корсукова А.В., Дорофеев Н.В., Грабельных О.И. Физиологические эффекты действия на растения фунгицидов триазольной природы // *Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология*. 2019. Т. 9. N 3. С. 461–476. DOI: 10.21285/2227-2925-2019-9-3-461-476. EDN: VLYINU.
4. Щербаков П.А. Ламадор: отличный старт и успешный финиш сельскохозяйственного сезона // *Защита и карантин растений*. 2010. N 3. С. 76–77. EDN: KZXZDX.
5. Грабельных О.И., Полякова Е.А., Корсукова А.В., Забанова Н.С., Бережная Е.В., Любушкина И.В. [и др.]. Разнонаправленные эффекты тебуконазол-содержащего протравителя семян «Бункер» на рост побегов и корней озимой пшеницы // *Известия Иркутского государственного университета. Серия: Биология. Экология*. 2020. Т. 34. С. 3–19. DOI: 10.26516/2073-3372.2020.34.3. EDN: PPGIZZ.
6. Gilley A., Fletcher R.A. Relative efficacy of paclobutrazol, propiconazole and tetraconazole as stress protectants in wheat seedlings // *Journal of Plant Growth Regulation*. 1997. Vol. 21. P. 169–175. DOI: 10.1023/A:1005804717016.
7. Rabert G.A., Rajasekar M., Manivannan P. Triazole-induced drought stress amelioration on growth, yield, and pigments composition of *Helianthus annuus* L. (sunflower) // *International Multidisciplinary Research Journal*. 2015. Vol. 5. P. 6–15.
8. Namjoyan S., Rajabi A., Sorooshzadeh A., AghaAlikhani M. The potential of tebuconazole for mitigating oxidative stress caused by limited irrigation and improving sugar yield and root quality traits in sugar beet // *Plant Physiology and Biochemistry*. 2021. Vol. 162. P. 547–555. DOI: 10.1016/j.plaphy.2021.03.027.
9. Bartlett D.W., Clough J.M., Godwin J.R., Hall A.A., Hamer M., Parr-Dobrzanski B. The strobilurin fungicides // *Pest Management Science*. 2002. Vol. 58, no. 7. P. 649–662. DOI: 10.1002/ps.520.
10. Giuliani M.M., Carucci F., Nardella E., Francavilla M., Ricciardi L., Lotti C., Gatta G. Combined effects of deficit irrigation and strobilurin application on gas exchange, yield and water use efficiency in tomato (*Solanum lycopersicum* L.) // *Scientia Horticulturae*. 2018. Vol. 233. P. 149–158. DOI: 10.1016/j.scienta.2018.01.052.
11. Zhang Y.-J., Zhang X., Chen C.-J., Zhou M.-G., Wang H.-C. Effects of fungicides JS399-19, azoxystrobin, tebuconazole and carbendazim on the physiological and biochemical indices and grain yield of winter wheat // *Pesticide Biochemistry and Physiology*. 2010. Vol. 98, no. 2. P. 151–157. DOI: 10.1016/j.pestbp.2010.04.007.
12. Liang S., Xu X., Lu Z. Effect of azoxystrobin fungicide on the physiological and biochemical indices and ginsenoside contents of ginseng leaves // *Journal of Ginseng Research*. 2018. Vol. 42, no. 2. P. 175–182. DOI: 10.1016/j.jgr.2017.02.004.
13. Бережная Е.В., Корсукова А.В., Федотова О.А., Дорофеев Н.В., Грабельных О.И. Особенности ростингибирующего эффекта фунгицида азоксистробина и его способность тормозить расход сахаров в проростках озимой пшеницы // *Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология*. 2020. Т. 10. N 4. С. 657–665. DOI: 10.21285/2227-2925-2020-10-4-657-665. EDN: VUVSXM.
14. Ali A.A.I., Desoky E.S.M., Rady M.M. Application of azoxystrobin fungicide improves drought tolerance in tomato, via enhancing physio-biochemical and anatomical

feature // International Letters of Natural Sciences. 2019. Vol. 76. P. 34–49. DOI: 10.56431/p-hg2stm.

15. Barányiová I., Klem K. Effect of application of growth regulators on the physiological and yield parameters of winter wheat under water deficit // Plant, Soil and Environment. 2016. Vol. 62, no. 3. P. 114–120. DOI: 10.17221/778/2015-PSE.

16. Filippou P., Antoniou C., Obata T., Van Der Kelen K., Harokopos V., Kanetis L., et al. Kresoxim-methyl primes *Medicago truncatula* plants against abiotic stress factors via altered reactive oxygen and nitrogen species signalling leading to downstream transcriptional and metabolic readjustment // Journal of Experimental Botany. 2016. Vol. 67, no. 5. P. 1259–1274. DOI: 10.1093/jxb/erv516.

17. Chiu Y.-C., Chen B.-J., Su Y.-S., Huang W.-D., Chen C.-C. A leaf disc assay for evaluating the response of tea (*Camellia sinensis*) to PEG-induced osmotic stress and protective effects of azoxystrobin against drought // Plants. 2021. Vol. 10, no. 3. P. 546. DOI: 10.3390/plants10030546.

18. Nason M.A., Farrar J., Bartlett D. Strobilurin fungicides induce changes in photosynthetic gas exchange that do not improve water use efficiency of plants grown under conditions of water stress // Pest Management Science. 2007. Vol. 63, no. 12. P. 1191–1200. DOI: 10.1002/ps.1443.

19. Байбакова Е.В., Нефедьева Е.Э. Изменения интенсивности дыхания проростков пшеницы под действием азоксистробина и регулятора роста // Вестник науки и образования. 2017. Т. 2. N 12. С. 29–32. EDN: ZXIXEL.

20. Санеева Е.А., Зорькина О.В., Нефедьева Е.Э. Исследование фитотоксического действия тебуконазола, флудиоксонила и препаратов на их основе на энергию прорастания и рост проростков пшеницы и горчицы белой // Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture. 2022. Т. 14. N 5. С. 166–186. DOI: 10.12731/2658-6649-2022-14-5-166-186. EDN: DNFEMT.

21. Mohsin S.M., Hasanuzzaman M., Bhuyan M.H.M.B., Parvin K., Fujita M. Exogenous tebuconazole and trifloxystrobin regulates reactive oxygen species metabolism toward mitigating

salt-induced damages in cucumber seedling // Plants. 2019. Vol. 8, no. 10. P. 428. DOI: 10.3390/plants8100428.

22. Mohsin S.M., Hasanuzzaman M., Nahar K., Hossain Md.S., Bhuyan M.H.M.B., Parvin K., Fujita M. Tebuconazole and trifloxystrobin regulate the physiology, antioxidant defense and methylglyoxal detoxification systems in conferring salt stress tolerance in *Triticum aestivum* L. // Physiology and Molecular Biology of Plants. 2020. Vol. 26. P. 1139–1154. DOI: 10.1007/s12298-020-00810-5.

23. Mohsin S.M., Hasanuzzaman M., Parvin K., Hossain Md.S., Fujita M. Protective role of tebuconazole and trifloxystrobin in wheat (*Triticum aestivum* L.) under cadmium stress via enhancement of antioxidant defense and glyoxalase systems // Physiology and Molecular Biology of Plants. 2021. Vol. 27, no. 5. P. 1043–1057. DOI: 10.1007/s12298-021-00983-7.

24. Bayoumi T.Y., Eid M.H., Metwali E.M. Application of physiological and biochemical indices as a screening technique for drought tolerance in wheat genotypes // African Journal of Biotechnology. 2008. Vol. 7, no. 14. P. 2341–2352.

25. Lazukin A., Pinchuk M., Korsukova A., Nikiforov A., Romanov G., Stepanova O., Grabelnych O. Comparison of presowing wheat treatments by low-temperature plasma, electric field, cold hardening, and action of tebuconazole-based disinfectant // Applied Sciences. 2022. Vol. 12, no. 13. P. 6447. DOI: 10.3390/app12136447.

26. Побежимова Т.П., Корсукова А.В., Боровик О.А., Забанова Н.С., Дорофеев Н.В., Грабельных О.И. [и др.]. Влияние тебуконазола и тебуконазол-содержащего препарата «Бункер» на функционирование митохондрий озимой пшеницы // Биологические мембраны. 2020. Т. 37. N 3. С. 224–234. DOI: 10.31857/S0233475520020103. EDN: JAQLEF.

27. Зубко Н.Г., Долженко Т.В. Действие фунгицидов на содержание фотосинтетических пигментов в растениях пшеницы яровой // Аграрная наука. 2022. N 12. С. 110–118. DOI: 10.32634/0869-8155-2022-365-12-110-118. EDN: VHQCBI.

REFERENCES

1. Hof H. Critical annotations to the use of azole antifungals for plant protection. *Antimicrobial Agents and Chemotherapy*. 2001;45(11):2987-2990. DOI: 10.1128/AAC.45.11.2987-2990.2001.

2. Davis T.D., Steffens G.L., Sankhla N. Triazole plant growth regulators // Horticultural Reviews. 1988;10:63-105. DOI: 10.1002/9781118060834.ch3.

3. Pobezhimova T.P., Korsukova A.V., Dorofeev N.V., Grabelnych O.I. Physiological effects of triazole fungicides in plants. *Izvestiya Vuzov. Prikladnaya Khimiya i Biotekhnologiya = Proceedings of Universities. Applied Chemistry and Biotechnology*. 2019;9(3):461-476. (In Russian). DOI: 10.21285/2227-2925-2019-9-3-461-476. EDN: VLYINU.

4. Shcherbakov P.A. Lamador: excellent start and successful finish of an agricultural season. *Zashchita i karantin rastenii*. 2010;(3):76-77. (In Russian). EDN: KZXZDX.

5. Grabelnych O.I., Polyakova E.A., Korsukova A.V., Zabanova N.S., Berezhnaya E.V., Lyubushkina I.V., et al. Differently directional effects of tebuconazole-based disinfectant of seeds “Bunker” on the growth of winter wheat shoots and roots. *Izvestiya Irkutskogo gosudarstvennogo*

universiteta. Seriya: Biologiya. Ekologiya = The Bulletin of Irkutsk State University. Series Biology. Ecology. 2020. T. 34. C. 3–19. (In Russian). DOI: 10.26516/2073-3372.2020.34.3. EDN: PPGIZZ.

6. Gilley A., Fletcher R.A. Relative efficacy of paclobutrazol, propiconazole and tetraconazole as stress protectants in wheat seedlings. *Journal of Plant Growth Regulation*. 1997;21:169-175. DOI: 10.1023/A:1005804717016.

7. Rabert G.A., Rajasekar M., Manivannan P. Triazole-induced drought stress amelioration on growth, yield, and pigments composition of *Helianthus annuus* L. (sunflower). *International Multidisciplinary Research Journal*. 2015;5:6-15.

8. Namjoyan S., Rajabi A., Sorooshzadeh A., AghaAlikhani M. The potential of tebuconazole for mitigating oxidative stress caused by limited irrigation and improving sugar yield and root quality traits in sugar beet. *Plant Physiology and Biochemistry*. 2021;162:547-555. DOI: 10.1016/j.plaphy.2021.03.027.

9. Bartlett D.W., Clough J.M., Godwin J.R., Hall A.A., Hamer M., Parr-Dobrzanski B. The strobilurin fungicides. *Pest Management Science*. 2002;58(7):649-662. DOI: 10.1002/ps.520.

10. Giuliani M.M., Carucci F., Nardella E., Francavilla M., Ricciardi L., Lotti C., Gatta G. Combined effects of deficit irrigation and strobilurin application on gas exchange, yield and water use efficiency in tomato (*Solanum lycopersicum* L.). *Scientia Horticulturae*. 2018;233:149-158. DOI: 10.1016/j.scienta.2018.01.052.

11. Zhang Y.-J., Zhang X., Chen C.-J., Zhou M.-G., Wang H.-C. Effects of fungicides JS399-19, azoxystrobin, tebuconazole and carbendazim on the physiological and biochemical indices and grain yield of winter wheat. *Pesticide Biochemistry and Physiology*. 2010;98(2):151-157. DOI: 10.1016/j.pestbp.2010.04.007.

12. Liang S., Xu X., Lu Z. Effect of azoxystrobin fungicide on the physiological and biochemical indices and ginsenoside contents of ginseng leaves. *Journal of Ginseng Research*. 2018;42(2):175-182. DOI: 10.1016/j.jgr.2017.02.004.

13. Berezhnaya E.V., Korsukova A.V., Fedotova O.A., Dorofeev N.V., Grabelnykh O.I. Growth-inhibiting effect of azoxystrobin and its ability to inhibit sugar consumption in winter wheat sprouts and roots. *Izvestiya Vuzov. Prikladnaya Khimiya i Biotekhnologiya = Proceedings of Universities. Applied Chemistry and Biotechnology*. 2020;10(4):657-665. (In Russian). DOI: 10.21285/2227-2925-2020-10-4-657-665. EDN: VUVSXM.

14. Ali A.A.I., Desoky E.S.M., Rady M.M. Application of azoxystrobin fungicide improves drought tolerance in tomato, via enhancing physio-biochemical and anatomical feature. *International Letters of Natural Sciences*. 2019;76:34-49. DOI: 10.56431/p-hg2stm.

15. Barányiová I., Klem K. Effect of application of growth regulators on the physiological and yield parameters of winter wheat under water deficit. *Plant, Soil and Environment*. 2016;62(3):114-120. DOI: 10.17221/778/2015-PSE.

16. Filippou P., Antoniou C., Obata T., Van Der Kelen K., Harokopos V., Kanetis L., et al. Kresoxim-methyl primes *Medicago truncatula* plants against abiotic stress factors via altered reactive oxygen and nitrogen species signalling leading to downstream transcriptional and metabolic readjustment. *Journal of Experimental Botany*. 2016;67(5):1259-1274. DOI: 10.1093/jxb/erv516.

17. Chiu Y.-C., Chen B.-J., Su Y.-S., Huang W.-D., Chen C.-C. A leaf disc assay for evaluating the response of tea (*Camellia sinensis*) to PEG-induced osmotic stress and protective effects of azoxystrobin against drought. *Plants*. 2021;10(3):546. DOI: 10.3390/plants10030546.

18. Nason M.A., Farrar J., Bartlett D. Strobilurin fungicides induce changes in photosynthetic gas exchange that do not improve water use efficiency of plants grown under conditions of water stress. *Pest Management Science*. 2007;63(12):1191-1200. DOI: 10.1002/ps.1443.

19. Baybakova E.V., Nefedieva E.E. Changes in the intensity

of wheat respiration under the action of azoxystrobin and growth regulator. *Vestnik nauki i obrazovaniya*. 2017;2(12):29-32. (In Russian). EDN: ZXIXEL.

20. Saneeva E.A., Zorkina O.V., Nefed'eva E.E. Research of the phytotoxic effect of tebuconazole, prothioconazole, fludioxonil and based on them products on the germination power and growth of seedlings of wheat and white mustard. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*. 2022;14(5):166-186. (In Russian). DOI: 10.12731/2658-6649-2022-14-5-166-186. EDN: DNFEMT.

21. Mohsin S.M., Hasanuzzaman M., Bhuyan M.H.M.B., Parvin K., Fujita M. Exogenous tebuconazole and trifloxystrobin regulates reactive oxygen species metabolism toward mitigating salt-induced damages in cucumber seedling. *Plants*. 2019;8(10):428. DOI: 10.3390/plants8100428.

22. Mohsin S.M., Hasanuzzaman M., Nahar K., Hossain Md.S., Bhuyan M.H.M.B., Parvin K., Fujita M. Tebuconazole and trifloxystrobin regulate the physiology, antioxidant defense and methylglyoxal detoxification systems in conferring salt stress tolerance in *Triticum aestivum* L. *Physiology and Molecular Biology of Plants*. 2020;26:1139-1154. DOI: 10.1007/s12298-020-00810-5.

23. Mohsin S.M., Hasanuzzaman M., Parvin K., Hossain Md.S., Fujita M. Protective role of tebuconazole and trifloxystrobin in wheat (*Triticum aestivum* L.) under cadmium stress via enhancement of antioxidant defense and glyoxalase systems. *Physiology and Molecular Biology of Plants*. 2021;27(5):1043-1057. DOI: 10.1007/s12298-021-00983-7.

24. Bayoumi T.Y., Eid M.H., Metwali E.M. Application of physiological and biochemical indices as a screening technique for drought tolerance in wheat genotypes. *African Journal of Biotechnology*. 2008;7(14):2341-2352.

25. Lazukin A., Pinchuk M., Korsukova A., Nikiforov A., Romanov G., Stepanova O., Grabelnykh O. Comparison of presowing wheat treatments by low-temperature plasma, electric field, cold hardening, and action of tebuconazole-based disinfectant. *Applied Sciences*. 2022;12(13):6447. DOI: 10.3390/app12136447.

26. Pobezhimova T.P., Korsukova A.V., Borovik O.A., Zabanova N.S., Dorofeev N.V., Grabelnykh O.I., et al. The influence of tebuconazole and tebuconazole-based disinfectant "Bunker" on the functioning of winter wheat mitochondria. *Biologicheskie membrany*. 2020;37(3):224-234. (In Russian). DOI: 10.31857/S0233475520020103. EDN: JAQLEF.

27. Zubko N.G., Dolzhenko T.V. The effect of fungicides on the content of photosynthetic pigments in spring wheat plants. *Agrarnaya nauka = Agrarian science*. 2022;(12):110-118. (In Russian). DOI: 10.32634/0869-8155-2022-365-12-110-118. EDN: VHQCBI.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Побежимова Тамара Павловна,
д.б.н., доцент, главный научный сотрудник,
Сибирский институт физиологии
и биохимии растений СО РАН,
664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 132,
Российская Федерация,
pobezhimova@sifibr.irk.ru
<https://orcid.org/0000-0002-9581-0123>

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Tamara P. Pobezhimova,
Dr. Sci. (Biology), Associate Professor,
Chief Researcher,
Siberian Institute of Plant Physiology
and Biochemistry SB RAS,
132, Lermontov St., Irkutsk, 664033,
Russian Federation,
pobezhimova@sifibr.irk.ru
<https://orcid.org/0000-0002-9581-0123>

Бережная Екатерина Владиславовна,
ведущий инженер,
Сибирский институт физиологии
и биохимии растений СО РАН,
664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 132,
Российская Федерация,
ekaterina809@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0003-4561-9600>

Полякова Елизавета Алексеевна,
аспирант, ведущий инженер,
Сибирский институт физиологии
и биохимии растений СО РАН,
664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 132,
Российская Федерация,
polyakova.elizaveta727@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-4830-5888>

Корсукова Анна Викторовна,
к.б.н., младший научный сотрудник,
Сибирский институт физиологии
и биохимии растений СО РАН,
664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 132,
Российская Федерация,
avkorsukova@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0002-8941-0772>

Забанова Наталья Сергеевна,
к.б.н., доцент,
старший научный сотрудник,
Сибирский институт физиологии
и биохимии растений СО РАН,
664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 132,
Российская Федерация,
доцент,
Иркутский государственный университет,
664003, г. Иркутск, ул. Карла Маркса, 1,
Российская Федерация,
pavnatser@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0003-2296-2326>

Любушкина Ирина Викторовна,
к.б.н.,
научный сотрудник,
Сибирский институт физиологии
и биохимии растений СО РАН,
664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 132,
Российская Федерация,
доцент,
Иркутский государственный университет,
664003, г. Иркутск, ул. Карла Маркса, 1,
Российская Федерация,
ostrov1873@yandex.ru
<https://orcid.org/0000-0001-6692-4482>

Степанов Алексей Владимирович,
к.б.н., старший научный сотрудник,
Сибирский институт физиологии
и биохимии растений СО РАН,
664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 132,
Российская Федерация,
saw33@list.ru
<https://orcid.org/0000-0002-0456-3690>

Ekaterina V. Berezhnaya,
Lead Engineer,
Siberian Institute of Plant Physiology
and Biochemistry SB RAS,
132, Lermontov St., Irkutsk, 664033,
Russian Federation,
ekaterina809@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0003-4561-9600>

Elizaveta A. Polyakova,
Postgraduate Student, Lead Engineer,
Siberian Institute of Plant Physiology
and Biochemistry SB RAS,
132, Lermontov St., Irkutsk, 664033,
Russian Federation,
polyakova.elizaveta727@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-4830-5888>

Anna V. Korsukova,
Cand. Sci. (Biology), Junior Researcher,
Siberian Institute of Plant Physiology
and Biochemistry SB RAS,
132, Lermontov St., Irkutsk, 664033,
Russian Federation,
avkorsukova@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0002-8941-0772>

Natalya S. Zabanova,
Cand. Sci. (Biology), Associate Professor,
Senior Researcher,
Siberian Institute of Plant Physiology
and Biochemistry SB RAS,
132, Lermontov St., Irkutsk, 664033,
Russian Federation,
Associate Professor,
Irkutsk State University,
1, Karl Marx St., Irkutsk, 664003,
Russian Federation,
pavnatser@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0003-2296-2326>

Irina V. Lyubushkina,
Cand. Sci. (Biology),
Researcher,
Siberian Institute of Plant Physiology
and Biochemistry SB RAS,
132, Lermontov St., Irkutsk, 664033,
Russian Federation,
Associate Professor,
Irkutsk State University,
1, Karl Marx St., Irkutsk, 664003,
Russian Federation,
ostrov1873@yandex.ru
<https://orcid.org/0000-0001-6692-4482>

Alexey V. Stepanov,
Cand. Sci. (Biology), Senior Researcher,
Siberian Institute of Plant Physiology
and Biochemistry SB RAS,
132, Lermontov St., Irkutsk, 664033,
Russian Federation,
saw33@list.ru
<https://orcid.org/0000-0002-0456-3690>

Дорофеев Николай Владимирович,
к.б.н., заместитель директора
по прикладной и инновационной работе,
Сибирский институт физиологии
и биохимии растений СО РАН,
664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 132,
Российская Федерация,
nicdoro@gmail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-0005-0134>

Грабельных Ольга Ивановна,
д.б.н., доцент,
главный научный сотрудник,
Сибирский институт физиологии
и биохимии растений СО РАН,
664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 132,
Российская Федерация,
профессор,
Иркутский государственный университет,
664003, г. Иркутск, ул. Карла Маркса, 1,
Российская Федерация,
✉ grolga@sifibr.irk.ru
<https://orcid.org/0000-0003-4220-6608>

Вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад
в подготовку публикации.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта
интересов.

*Все авторы прочитали и одобрили
окончательный вариант рукописи.*

Информация о статье

Поступила в редакцию 21.10.2023.
Одобрена после рецензирования 10.11.2023.
Принята к публикации 30.11.2023.

Nikolay V. Dorofeev,
Cand. Sci. (Biology), Vice-Director,
Siberian Institute of Plant Physiology
and Biochemistry SB RAS,
132, Lermontov St., Irkutsk, 664033,
Russian Federation,
nicdoro@gmail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-0005-0134>

Olga I. Grabelnych,
Dr. Sci. (Biology), Associate Professor,
Chief Researcher,
Siberian Institute of Plant Physiology
and Biochemistry SB RAS,
132, Lermontov St., Irkutsk, 664033,
Russian Federation,
Professor,
Irkutsk State University,
1, Karl Marx St., Irkutsk, 664003,
Russian Federation,
✉ grolga@sifibr.irk.ru
<https://orcid.org/0000-0003-4220-6608>

Contribution of the authors

The authors contributed equally to this article.

Conflict interests

The authors declare no conflict of interests
regarding the publication of this article.

*The final manuscript has been read and approved
by all the co-authors.*

Information about the article

The article was submitted 21.10.2023.
Approved after reviewing 10.11.2023.
Accepted for publication 30.11.2023.